Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 110 (1992)

Heft: 26

Artikel: Aussergewöhnliche Lösungen im Leitungsbau: ein rekordverdächtiger Betonfreileitungsmast

Autor: Krumm, Bruno

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-77933

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Aussergewöhnliche Lösungen im Leitungsbau

Ein rekordverdächtiger Betonfreileitungsmast

Im Freileitungsbau sind Holz, Beton oder Stahl die Basismaterialien für Masten. Bei Niederspannungsleitungen werden hauptsächlich imprägnierte Holzstangen, bei Mittelspannungsleitungen eher Betonmasten und bei Höchstspannungsleitungen ab 220 kV Stahlgitter- und Stahlvollwandmasten verwendet. Dass aber auch abweichende Gebrauchsarten möglich sind, zeigt der folgende Bericht über einen erstmals erstellten 380/220/110 kV-Betonabspannwinkelmasten in einer 380 kV-Freileitung, der höchsten elektrischen Spannungsebene in der Schweiz und in Europa.

VON BRUNO KRUMM ET AL, ZÜRICH

Das Verbundnetz der schweizerischen Elektrizitätsversorgung besteht aus 220 kV- und 380 kV-Freileitungen. Vermehrt werden 220 kV-Leitungen auf 380 kV umgebaut, um grössere Übertragungskapazitäten zu schaffen, Uebertragungsverluste zu senken und um die Schweiz im europäischen 380 kV-Netz besser einzubinden. Der heute notwendige Stromaustausch der Länder Europas ist die wichtigste Voraussetzung für eine sichere Stromversorgung.

Bild 1. Der höchste Betonfreileitungsmast Europas (59,5 m Höhe)

Das Projekt

Im Zuge eines solchen Leitungsumbaus von 220 kV auf 380 kV, zwischen Innertkirchen und Mettlen, wurde ein von den Centralschweizerischen Kraftwerken (CKW) neuerstelltes Unterwerk in Littau bei Luzern in einen Strang der erwähnten EWZ/BKW-Leitung eingeschlauft. Dafür musste eine drei Kilometer lange 380/220/110 kV-Leitung neu gebaut werden. Dank der günstigen Topographie auf dem vorgegebenen Trassee konnte eine Lösung mit Portalmasten als zweckmässigste Bauart gewählt werden. Gegenüber herkömmlichen Gittermasten ist ein Portalmast kleiner und die gesamte Leitung fügt sich besser in das Landschaftsbild ein.

Die 13 Tragmasten von durchschnittlich 40 m Höhe, 15 m Breite und 70 t Einzelgewicht erforderten einige Anstrengungen bei der Fabrikation, beim Transport und bei der Montage. Ein spezielles Problem stellte jedoch der 60 m hohe und 307 t schwere Abspannwinkelmast vor dem UW Littau dar. Zum Vergleich sei erwähnt, dass ein herkömmlicher Betonmast für die weit verbreiteten 11- oder 50-kV-Freileitungen 25 bis 30 m hoch ist und 8 bis 15 t wiegt. Mit dem Betongewicht dieses Mastes hätte man also ohne weiteres 25 «normale» Masten oder etwa 4 km Betonmastenleitung bauen können.

Die ersten Überlegungen für den besonderen Masten begannen mit der Evaluation des Masttyps: Stahlgittermast, Vollprofilmast und Schleuderbetonmast standen zur Auswahl. Er musste machbar, standortkonform und frankengerecht sein. Ein ästhetisch «gestylter» Betonmast mit nur je zwei doppelten Druck- und zwei einfachen Zugbeinen war dann die bevorzugte Lösung. Berechnung, Fabrikation und Aufstellen dieses gigantischen Mastes waren eine einmalige und nicht ungefährliche Präzisionsarbeit. (Vgl. Bild 1)

Der Abspannwinkelmast vor dem UW Littau ist mit Sicherheit der grösste und schwerste Betonfreileitungsmast, der in Europa je aufgestellt wurde. Vielleicht gibt es auf der ganzen Welt keinen grösseren. So erklärt sich auch der Titel dieses Berichtes: Der Mast ist wirklich rekordverdächtig.

(Inzwischen durften wir alle mit grosser Freude feststellen, dass sich unser Verdacht bestätigt hat und unser Projekt dem Guiness-Buch der Rekorde eine Erwähnung mit grossem Foto wert war. [Guiness-Buch der Rekorde 1992, S. 187] !)

Der Abspannwinkelmast

Entwurf

Der als Tragwerk auszubildende Abspannwinkelmast musste bei Anordnung von drei Auslegerebenen für insgesamt 18 Leiterseile, einen Lichtwellenleiter und ein Erdseil, eine Konstruktionshöhe von rund 60 m aufweisen. Er sollte eine auf die Spitze reduzierte Zugkraft von 254 kN in Leitungsrichtung und eine solche von mindestens 275 kN in Richtung der Halbierenden des Leitungswinkels von 225,2 gon aufnehmen können. Lösungsentwürfe auf der Basis bereits gebauter und bewährter Mastkonstruktionen konnten den hohen Anforderungen nicht genügen. Durch eine Kombination geeigneter Elemente dieser Mastkonstruktionen konnte aber eine Lösung gefunden werden, nämlich ein A-Portalmast mit je Hälfte einem Zugbein und einem doppelten, in Leitungsrichtung gekuppelten Druckbein sowie zusätzlich einem Versteifungsriegel auf $^2/_5$ der Masthöhe.

Aus Transport- und Montagegründen mussten die 6 Mastbeine und die 3 Ausleger zweiteilig ausgeführt werden. Das Gewicht der Mastbeinoberteile mit dem Schwerpunkt auf 42 m Höhe über Terrain durfte maximal je 20 t, dasjenige der auf 57 m zu hebenden Auslegerhälften je 12 t betragen.

Statik

Das Masttragwerk muss den Gebrauchslasten mit genügender Si-

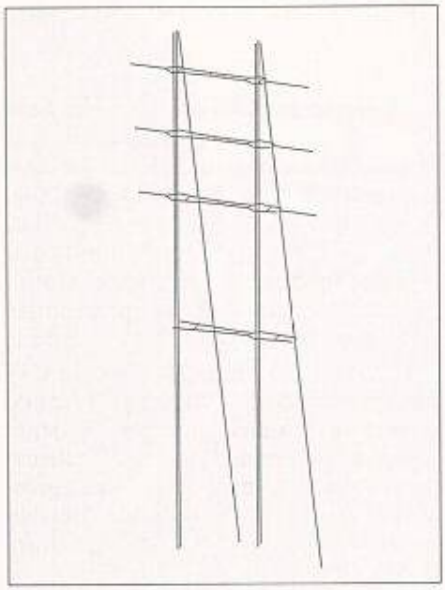

Bild 2. Stabtragwerk

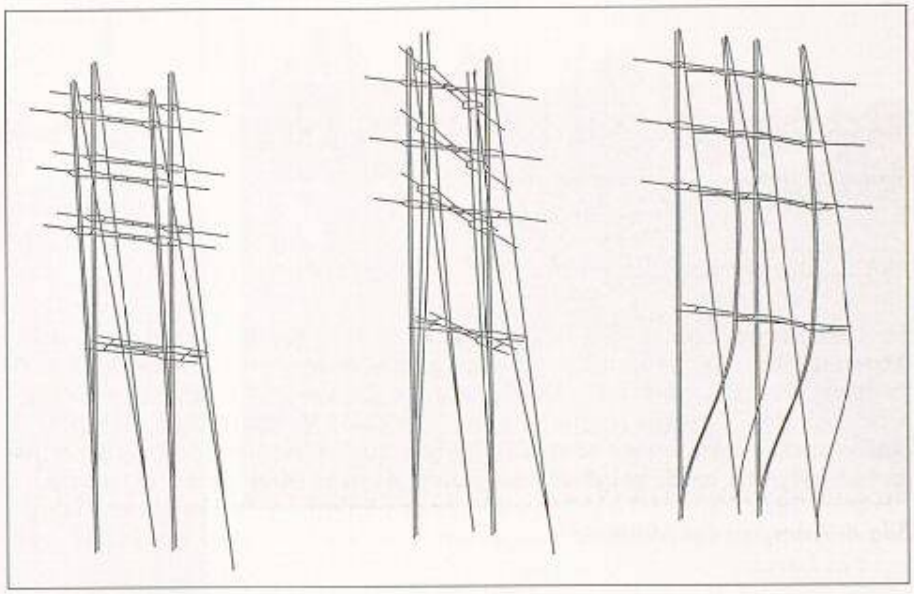

Bild 3. Eigenschwingungsformen

cherheit standhalten. Sowohl die Belastungsannahmen als auch die erforderliche Sicherheit gegen Bruch sind in der bundesrechtlichen Verordnung über die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt von elektrischen Starkstromanlagen, kurz Starkstromverordnung, festgelegt. Die Berechnung konstruktiver Details wurde unter Anwendung der Normen SIA 162 und 161 durchgeführt.

Die statischen Berechnungen erfolgten mit dem Programm «Statik 2000» an einem räumlichen Stabtragwerk mit 145 Knoten und 187 Stäben. Die in drei Fundamentblöcken je 3 m tief einbetonierten Mastfüsse wurden als eingespannt gerechnet. Die je drei in zwei Mastspitzen gekuppelten Mastzöpfe wurden als exzentrisch angeschlossen betrachtet. Ausleger und Versteifungsriegel wurden im Berechnungsmodell an die entsprechenden Mastknotenpunkte ebenfalls exzentrisch angeschlossen. (Vgl. Bild 2)

Die Belastungen umfassten Eigenlasten des Tragwerks, Lasten der Seile und Isolatoren, Seilzugkräfte, Windlasten auf Tragwerk, Seile und Isolatoren sowie Zusatzlasten infolge Schnee und Eis auf den Seilen. In einer ersten Berechnungsreihe wurden alle von der Starkstromverordnung geforderten Lastfallkombinationen untersucht. In einer zusätzlichen Berechnungsreihe wurden der Dauerlastfall nach der Theorie 2. Ordnung sowie die Knickstabilität von Einzelstäben und des gesamten Masttragwerks abgeklärt. Eine dynamische Untersuchung erlaubte zudem die Beurteilung von Schwingungseigenformen im Hinblick auf eine eventuelle Anregung durch Windkräfte oder Seilschwingungen.

Für die Mastschäfte bedeutet die einseitige Beanspruchung durch 40% der maximalen Seilzugkräfte den massgebenden Lastfall. Die gewählten Querschnittsabmessungen erlaubten die Knickstabilität von Einzelstäben wie auch des gesamten Tragwerks nachzuweisen. Das Masttragwerk zeigte sich als träge und wenig schwingungsempfindlich. Die Eigenfrequenzen der ersten drei Eigenschwingungsformen (quer, Torsion, längs) betragen zwischen 0,044 und 0,21 Hz. (Vgl. Bild 3)

Herstellung

Die Mastteile wurden in Schleuderbeton ausgeführt. Das Schleuderverfahren für Freileitungsmaste wird in der Schweiz bereits seit 1946 angewendet.

In eine teilbare Schalungsform aus Stahl wird das benötigte Armierungsgerippe bestehend aus Längsstäben und Spiralen eingelegt und die errechnete Betonmenge eingefüllt. Nach dem Schliessen wird die Form in die Schleudermaschine eingezogen, festgeklemmt und in Rotation versetzt. Durch die Zentrifugalkraft wird der Beton an die Schalung gepresst und mit 30- bis 40-facher Erdbeschleunigung gleichmässig verdichtet. Der dabei entstehende Hohlquerschnitt weist eine harte, glatte, porenfreie und äusserst witterungsbeständige Oberfläche auf.

Mit 450 kg hochwertigem Portlandzement und Trass als Bindemittel je m^3 Fertigbeton, richtig abgestuften Zuschlagstoffen mit einem Grösstkorn von 16 mm Durchmesser sowie eventueller Beigabe von Farbpigmenten wird in der Produktion eine Betonqualitätsstufe von mindestens B65/55 erreicht. Für die Längsarmierung wurde Topar 500 S, für die Spiralarmierung ein speziell dafür geeigneter, hochfester Armierungsstahl verwendet.

Der Mast mit 6 Mastbeinen wurde in 18 einzeln zu produzierende zylindrische bzw. zylindrisch/konische Abschnitte unterteilt. 12 zylindrische Abschnitte wurden durch werkseitig geschweisste, einseitige Überlappungsstösse zu 6 Mastunterteilen ergänzt. Je 6 Unter- und Oberteile wurden für eine möglichst einfache, rationelle Montage vor Ort vorbereitet. Für die beiden doppelten Druckbeine waren genauestens aufeinander passende Metallkonusse als Verbindungsmittel vorgesehen. Bei den beiden einfachen Zugbeinen wurde je ein die maximalen Zugkräfte übertragendes Stahlrohr innen an die vorspringende Hauptarmierung angeschweisst. Das Gewicht der 12 Mastteile betrug zwischen 18 und 24 t.

Der Versteifungsriegel und die 3 Ausleger wurden in vibriertem Beton ausgeführt. Während der gut 12 t schwere Riegel in einem Stück produziert werden konnte, mussten die Ausleger aus Montagegewichtsgründen zweiteilig mit verschraubbaren Verbindungsblechen vorgesehen werden. Das Maximalgewicht je Auslegerhälfte betrug rund 8 t. Als Vorbereitung für erst nachträglich bauseitig zu montierendes, zusätzliches Armierungs- und Schalungsmaterial wurden zahlreiche Ankerschienen einbetoniert, welche ein rationelles Arbeiten in luftiger Höhe ermöglichen mussten.

Transport und Montage

Die Mastbeine, Riegel und Auslegerhälften mussten wegen beschränkter Platzverhältnisse am Standort in der richtigen Reihenfolge und zeitlich gestaffelt angeliefert werden. Der Transport vom Hersteller zum Bahnhof Rothenburg-Station erfolgte auf 8 Bahnwagen des Typs RS, 6 davon mit je

Bild 4. Transport der Mastteile

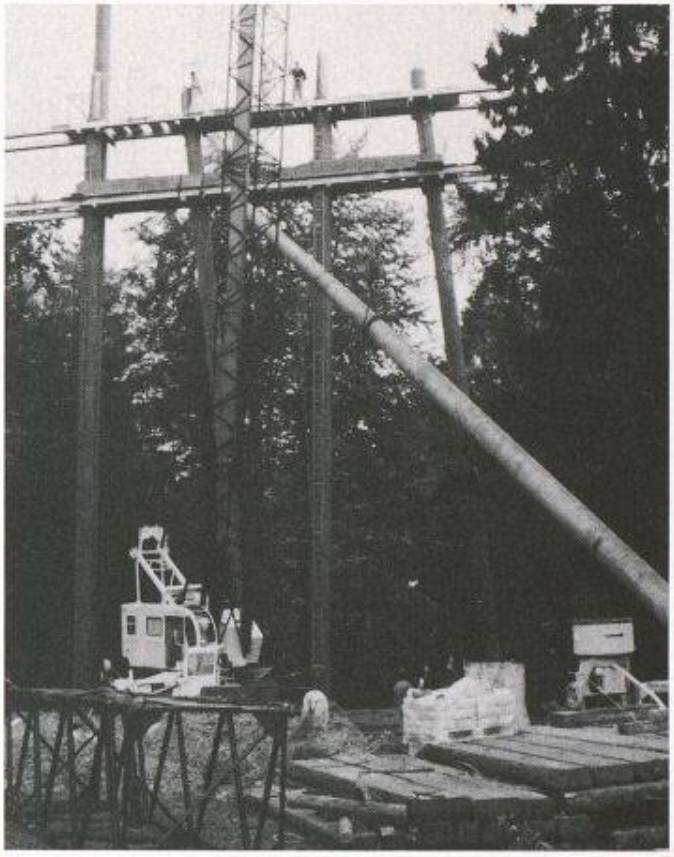

Bild 5. Autokran mit angehängtem Mastoberteil

zwei angehängten Schutzwagen des Typs KS. Nach dem Umlad wurde der Transport auf der restlichen Strecke von 7 km mittels Spezialfahrzeugen der Montagefirma bewältigt. (Vgl. Bild 4)

Als Vorbereitung zur Mastmontage mussten ein etwa 100 m langer Zufahrtsweg und eine horizontale Arbeitsplattform für den Autokran erstellt werden. Zu letzterem Zwecke wurde unmittelbar bei den Mastfundamenten eine 4 m hohe, hinterfüllte und mit Stahlseilen rückverankerte Spundwand geschlagen.

Das Versetzen der Mastunterteile erfolgte mittels Autokran, beginnend am äussersten Druckbein. Die Unterteile wurden mit Seilwinden gerichtet, in den Köchern verkeilt und, wo vorgesehen, mit Bolzen gekuppelt. Anschliessend wurde der Versteifungsriegel auf die an den Mastbeinen auf der richtigen Höhe festgeklemmte Tragvorrichtung aus Aluminiumträgern gehoben und an den Mastbeinen durch Seile gesichert. Nach der definitiven Positionierung der oberen Mastbeinachspunkte wurden die Mastfüsse in den Köchern eingegossen. Zum Abschluss der Montagearbeiten am Unterteil wurden die Aussparungen zwischen Versteifungsriegel und Mastbeinen mit in Säcken als Trockengemisch vorbereitetem, schwindkompensiertem Spezialbeton ausgegossen.

Wiederum beim äussersten Druckbein beginnend, wurden nun die Mastoberteile vom Autokran mit möglichst wenig Ausladung hochgehoben und auf die Unterteile aufgesetzt. Bei den Druckbeinen wurden die Metallkonusse vor dem Zusammenfügen mit einem Zweikomponentenkleber gegen Korrosion geschützt. (Vgl. Bilder 5 und 6)

Die Druckbeinhälften wurden nach dem Aufsetzen sofort mittels Bolzen und am Mastkopf mittels massiven Stahlkeilen gekuppelt. Die Zugbeine wurden nach dem Aufsetzen vorerst am Mastkopf über Stahlkeile mit dem zugehörigen Druckbein verbunden. Darauf wurden die Stahlrohranschlüsse des Ober- und Unterteils kraftschlüssig verschweisst.

Nach dem Verlängern des Kranauslegers wurden die Auslegerhälften über die zugehörige Mastspitze gehoben, auf der vorgesehenen Höhe auf die festgeklemmte Tragvorrichtung abgesenkt und durch Seile gesichert. Anschliessend wurden die Hälften durch Verbindungsbleche miteinander verschraubt. Nach dem Aufsetzen der beiden Mastkappen konnten von oben beginnend sämtliche Aussparungen zwischen Mast und Auslegern, nachträglich anzubringende Querstege bei den Auslegern sowie die Betonumhüllung der Stahlrohrverbindung bei den Zugbeinen mit schwindkompensiertem Spezialbeton ausgegossen werden. Der Mast war nun für die Seilmontage bereit. Die beschriebenen Montagearbeiten hatten insgesamt 12 Arbeitstage in Anspruch genommen. (Vgl. Bild 7)

Fundation

Der Maststandort befindet sich in einem steilen Graben, dessen Untergrund aus Molassenmergel, die Flanken jedoch aus einer labilen Lockergesteinsschicht bestehen. Anhaltende Ufererosion durch ein Bächlein und gespanntes Hangwasser führen schubweise zu aktiven Kriechbewegungen in den beiden Grabenflanken, wobei vermutlich die Schichtgrenze zwischen der Lockergesteinsüberdeckung und dem Molassefels als basale Gleitfläche wirkt. Da längerfristig infolge hangparaleller Kluftscharen in der Molasse auch ein Abgleiten grösserer Felspakete nicht ausgeschlossen werden konnte, waren besondere Massnahmen zur Sicherung der Mastfundamente unumgänglich.

Aufgrund obiger Gegebenheiten schied eine herkömmliche Flachfundation aus. An deren Stelle wurde eine Gründung mit 3 im Molassefels einbindenden und verankerten Einzelfundamenten gewählt. Die Tiefe der Felsoberfläche wurde mittels 6 Rammsondierungen zu etwa 3 bis 5 m ab OKT, die Talwärts-Neigung zwischen 4 bis 8° ermittelt.

Die Fundamente müssen die aus Mastbelastung und natürlicher Kriechbewegung resultierenden Zug-, Druck- und Horizontalkräfte so ins Erdreich abtragen, dass unzulässige Verformungen ausgeschlossen werden können. Zu diesem Zweck werden die Zugkräfte vollständig durch die Verankerung über-

Wichtige Daten

Mastlänge:		59,5 m
Betongewichte:	4 Druckbeine	170 t
	2 Zugbeine	79 t
	3 Ausleger	45 t
	1 Riegel	13 t
	Total Abspannwinkel	307 t
Leitungwinkel in gon:		225,2
Belegung:	2 Erdseile	350 mm2
	6 Bündelleiter, 380 kV	2 x 600 mm2
	6 Einfachleiter, 110 kV	600 mm2
Äussere Maximallasten:	Abspannkraft in Leitungsrichtung	320 kN
	Winkelzug quer zur Leitung	350 kN
	Angriffshöhe über OK-Fundament	45 m
	Vertikallast	400 kN
Kosten:	Fundament	Fr. 150 000.–
	Mastteile	Fr. 250 000.–
	Montage	Fr. 100 000.–
	Total Abspannwinkelmast	Fr. 500 000.–

nommen, während die Druckkräfte über die Bodenpressung und die Horizontalkräfte über die aus der Verankerung resultierenden Reibungskräfte abgetragen werden. Der Kriechdruck wurde nach der Überschiebungstheorie mit Hilfe eines kinematisch möglichen, aus verschiedenen Bruchkörpern zusammengesetzten Gleitmechanismus ermittelt. Die erforderlichen Ankerkräfte ergeben sich hieraus zu je 2 400 kN für die beiden äusseren und 6 000 kN für das mittlere Fundament.

Die Einbindetiefe der Fundamente im Molassefels wurde vor Ort auf etwa 1,5 m festgelegt, woraus sich Fundationstiefen bis über 5 m ab OKT ergeben.

Zur Aufnahme der hohen Verankerungskräfte wurden Injektionsfelsanker (Dywidag-Litzenbündelanker) gewählt und auf die Ankerklasse 6 ausgelegt. Die Gebrauchslast wurde angesichts der unvermeidlichen Verankerung im Mergel auf VG = 600 kN beschränkt. Die erdstatisch erforderliche freie Ankerlänge von 8 m wurde aus dem gleichen Grund sicherheitshalber auf Lf = 12 m erhöht. Die Verankerungsstrecke wurde vom Unternehmer zu Lv = 7 m gewählt.

Beim Bohren der total 18 Anker bestätigte sich, dass die Verankerungsstrecken durchwegs im Mergel liegen; nennenswerte Qualitätsunterschiede wurden jedoch nicht festgestellt. Trotzdem erfüllten bei der Spannprobe 4 Anker desselben Fundaments die Prüfbedingungen nicht und konnten somit nur mit reduzierter Ankerkraft in Rechnung gestellt werden. Es wurden deshalb 2 zusätzliche Anker erstellt und hierbei die freie Ankerlänge auf Lf = 18 m und die Verankerungsstrecke auf Lv = 9 m erhöht. Mit diesen Zugaben konnten die gestellten Anforderungen, Ankerklasse 6, VG = 600 kN, einwandfrei erfüllt werden. (Vgl. Bild 8)

Vermessung

Die Aufgabenstellung kann wie folgt kurz umschrieben werden. In den Mastfundamenten waren vier 3 m tiefe, rechteckige Köcher ausgespart. In die zwei grösseren Köcher wurden je zwei Betonmastelemente als Doppeldruckbein, in die anderen je ein Element als Zugbein gestellt. Sobald die Lage fixiert war, wurden die Aussparungen mit Beton ausgegossen. Druck- und Zugbeine mit einer gegenseitigen Neigung von 5,8 cm pro Meter mussten sich in 60 m Höhe auf +/- 15 mm genau treffen. Die 30 m langen Mastteile wurden in zwei Etappen montiert. Für diesen Zweck mussten die unteren Elemente so genau gestellt und verankert werden, dass die oberen ohne spezielle Vermessung nur noch aufgesetzt und verbunden werden konnten. Die Aufgabe der Vermessung bestand darin, bei der Montage der Masten gleichzeitig längs zur Fundamenthauptachse die senkrechte Richtung und quer zur Hauptachse die genaue Neigung und Lage anzugeben.

Es war klar, dass für diese Arbeiten die sonst üblichen «Schnurgerüstmethoden» bzw. das Einfluchten mit zwei Theodoliten nicht zum Ziele führen konnten. Es wurde entschieden, alle für die Montage wichtigen Punkte in einem lokalen Raumkoordinatensystem zu berechnen, um sie dann mittels Winkel und Distanzmessung im Feld abzustecken.

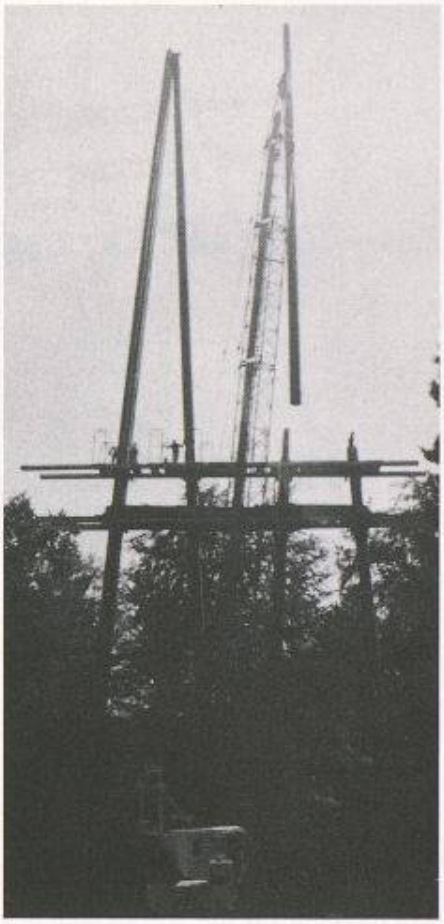

Bild 6. Kran mit maximal gehobenem Mastteil

Am Bau Beteiligte

Bauherren:
- Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, 8023 Zürich
- Bernische Kraftwerke AG, 3000 Bern 25
- Centralschweizerische Kraftwerke, 6002 Luzern

Projekt und Bauleitung:
Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, Abt. Übertragungsleitungen, 8023 Zürich

Konzept Mast, Statik, Fabrikation:
Sacac, Schleuderbetonwerk AG, 5600 Lenzburg 1

Fundamentstatik:
Grundbauberatung AG, 9000 St. Gallen

Vermessung:
Ingenieurbüro T. Merkl AG, 9410 Heiden

Fundamentbau:
Fritz Lötscher AG, 6014 Littau

Lockergesteinsanker:
Gasser-Felsbau, Gasser AG, 6078 Lungern

Mastmontage:
- Ernst Jucker, Spezialtransporte, 8493 Saland
- Ernst Autotransport AG, 8029 Zürich
- Kull & Cie, Elektrische Unternehmungen, 8038 Zürich
- Lebag Leitungs- und Elektrobau AG, 5430 Wettingen

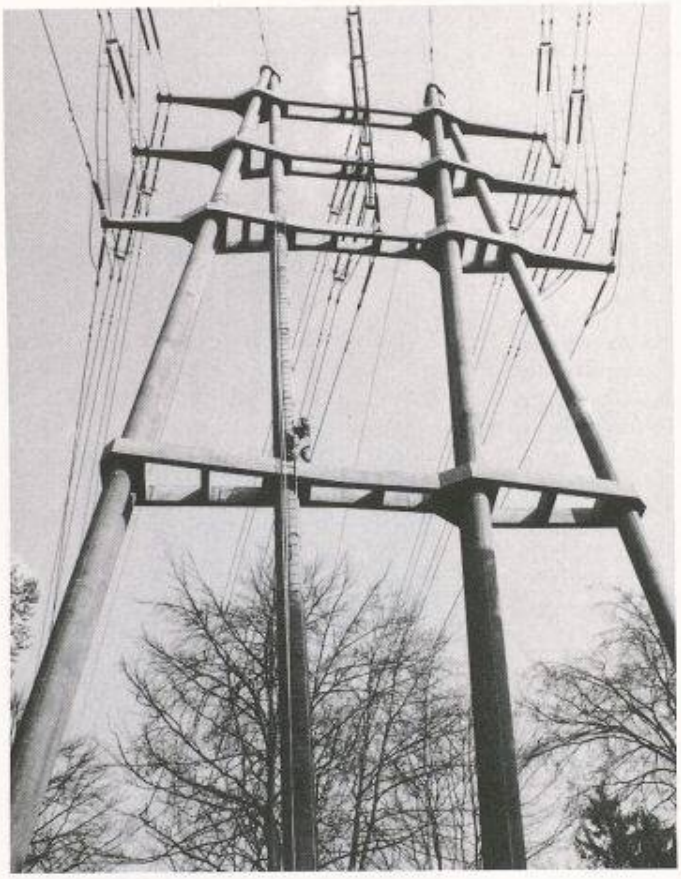

Bild 8. Köcherfundament mit Litzenankern

Bild 7. Abspannwinkelmast nach der Seilmontage

Erschwerend für die Ausführung der Vermessungsarbeiten wirkte sich folgendes aus:

Die Fusspunkte der Masten in den Köchern waren nicht einsehbar. Trotzdem war sicherzustellen, dass an den Köchern des Fundaments nicht abgespitzt werden musste.

Infolge der schiefen Lage der Masten musste deren Durchbiegeverhalten berücksichtigt werden. Theoretische Berechnungen allein schienen als zu wenig zuverlässig, so dass die Durchbiegungen im Verlauf der Montage gemessen und für die weitere Absteckung berücksichtigt wurden.

Gestützt auf die Vorabklärungen wurden folgende Arbeitsabläufe festgelegt:

- Ausmessen der Köcher und Berechnung der notwendigen Futterung der Masten.
- Absteckung der Mastmitten und des vorfabrizierten Versteifungsriegels auf 24 m Höhe.
- Bestimmung und Fixierung der gegenseitigen Lage der Mastteile in Mastmitte.

Für den letzten Teil der Montage waren keine speziellen Vermessungsarbeiten mehr notwendig, weil nach dem Ausgiessen der Aussparungen des Versteifungsriegels keine Lageveränderungen der Masten mehr möglich waren.

Als Instrumentenstandorte wurden drei Fixpunkte ausserhalb des Montagebereiches mittels eines Präzisionspolygonzugs bestimmt. Auf den Mastenden mussten genau in der Verlängerung der Mastachsen je ein etwa 20 cm langer Dorn für den Aufsatz eines Messspiegels angeschweisst werden.

Mit zwei elektronischen Theodoliten, Wild TC 1600, war es möglich, bei der Mastmontage jederzeit und unabhängig die Koordinaten x, y, z der Mastspitzen zu bestimmen und die notwendigen Korrekturen an den zur Montage benötigten Hilfsseilen zu veranlassen. Zwei Instrumente waren notwendig, um bei verdeckten oder ungünstigen Sichtverhältnissen umgehend auf dem Ersatzinstrument weitermessen zu können.

Schwierig war die endgültige Bestimmung und Fixierung der gegenseitigen Lage der 6 Mastelemente vor dem Ausgiessen des Versteifungsriegels. In der Vormittagskühle verlief alles planmässig, doch mit zunehmender Sonneneinstrahlung wurde festgestellt, dass sich bereits fixierte Masten nicht mehr in der ursprünglichen Sollage befanden! Durch einseitige Erwärmung der Masten entstanden Krümmungen, die Verschiebungen bis zu 3 cm verursachten.

Um die Sollabstände zwischen den einzelnen Mastelementen einzuhalten, konnte also nicht mehr auf die berechneten lokalen Koordinaten abgestützt werden. Als Bezugspunkt musste deshalb jeweils die Spitze des zuletzt durch Ausgiessen mit Beton fixierten Mastelementes dienen. Dies erforderte grosse Flexibilität in der laufenden Beobachtung und Berechnung der notwendigen Korrekturen.

Die geforderte Messgenauigkeit von +/– 5 mm für die Festlegung von Mastfuss und Mastmitte konnte eingehalten werden. In der praktischen Ausführung wurde schlussendlich für die Mastachse eine Lagegenauigkeit zwischen 5 und 15 mm erreicht. Von Interesse war die Durchbiegung der schief in den Köchern einbetonierten, frei stehenden Masten. Die Ist-Lage wurde etwa alle 4 m durch reine Horizontal- und Vertikalwinkelmessungen festgestellt. Die maximale Durchbiegung der 30 m hohen Mastunterteile betrug durchschnittlich 15 mm.

Die Ausführung der Vermessungsarbeiten bei dieser Mastmontage hat gezeigt, dass ein blindes Vertrauen auf die theoretischen Berechnungen gefährlich ist. Witterungseinflüsse wie Sonneneinstrahlung und die Genauigkeit von Mastproduktion und Montage waren unbedingt zu beachten. Dies setzt ein flexibles und rasches Handeln der Vermessungsfachleute voraus.

Adressen der Verfasser: *Bruno Krumm*, El. Ing. HTL, c/o Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, 8023 Zürich; *Urs Egloff*, dipl. Bauing. ETH/SIA, c/o Sacac, Schleuderbetonwerk AG, 5600 Lenzburg; *Silvio Mussato*, Bauing. HTL, c/o Grundbauberatung AG, 9000 St. Gallen; und *Florin Rupper*, dipl. Bauing. ETH, c/o T. Merkl AG, 9410 Heiden.